

ОЦЕНКА КОНСТРУКТИВНОЙ ПРОЧНОСТИ СТАЛЕЙ ТИПА 06Г2СМБ ПО ПАРАМЕТРАМ МИКОСТРУКТУРЫ

Григорьева А.М., Полухина О.Н.

Руководитель к.т.н. Селиванова О.В.

УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, sov23@mail.ru

В работе проведена количественная оценка предела текучести по параметрам структуры для сталей типа 06Г2СМБ различных производителей, плавочный состав которых приведён в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав исследуемых сталей, масс. %

Произво-дитель	C	Mn	Si	S	P	V	Nb	Ti
А	0,08	1,85	0,39	0,001	0,013	0,002	0,05	0,016
	Cu	Ni	Cr	Al	B	Mo	N	Ca
	0,17	0,22	0,19	0,034	0,0003	0,133	0,004	0,001
В	C	Mn	Si	S	P	V	Nb	Ti
	0,05	1,87	0,10	0,004	0,007	-	0,024	0,019
	Cu	Ni	Cr	Al	B	Mo	N	Ca
	0,49	0,63	0,26	0,041	0,0001	0,010	0,0024	-

При помощи металлографического анализа микроструктуры были определены относительное количество и размер структурных составляющих.

Электронно-микроскопическое исследование проводилось методом тонких фольг и экстракционных реплик на просвечивающих электронных микроскопах ЭМВ-100Л и JEM-2100. На основе электронно-микроскопических исследований оценивались плотность дислокаций, размер дисперсных частиц и расстояние между ними.

Исследование микроструктуры и фазового состава сталей позволило оценить величину отдельных факторов упрочнения исходя из аддитивного вклада в предел текучести отдельных упрочняющих факторов [1]:

$$\sigma_T = \sigma_0 + \Delta\sigma_{т.р.} + \Delta\sigma_{п} + \Delta\sigma_{д.у.} + \Delta\sigma_{д} + \Delta\sigma_{з}, \quad (1)$$

где σ_0 – напряжение трения решетки или напряжение Пайерлса–Набарро; $\Delta\sigma_{т.р.}$ – твёрдорастворное упрочнение; $\Delta\sigma_{п}$ – перлитное упрочнение; $\Delta\sigma_{д}$ – дислокационное упрочнение; $\Delta\sigma_{д.у.}$ – дисперсионное упрочнение; $\Delta\sigma_{з}$ – упрочнение границами зёрен и субзёрен зернограницное упрочнение.

Напряжение Пайерлса – Набарро рассчитывалось по формуле:

$$\sigma_0 = 2 \cdot 10^{-4} \cdot G, \quad (2)$$

где G – модуль сдвига, для железа $G = 84000$ МПа.

Для обеих сталей получили $\sigma_0 = 2 \cdot 10^{-4} \cdot 84000 = 16,8$ МПа.

При расчёте предела текучести принимаемые значения σ_0 должны быть несколько большими, так как в твёрдом растворе всегда растворено некоторое количество примесей внедрения [10^{-2} % (C+N)], и имеются дефекты кристаллического строения. Поэтому напряжение Пайерлса-Набарро принималось $\sigma_0 \sim 30$ МПа [1].

Количественная оценка твердорастворного упрочнения при легировании производилась в предположении аддитивности вкладов в упрочнение отдельных легирующих элементов.

$$\Delta\sigma_{т.р.} = \sum(k_i \cdot c_i) \quad (3)$$

где k_i – коэффициент упрочнения феррита, представляющий собой прирост предела текучести при растворении в нём 1 % (по массе) i -того легирующего элемента; c_i – концентрация, % (по массе) i -того легирующего элемента растворённого в феррите.

Коэффициент упрочнения определяют при специальных исследованиях по влиянию легирования на свойства матрицы сплавов [1].

По формуле (3) твердорастворное упрочнение для стали А составило:

$$\Delta\sigma_{т.р.} = \sum 1,85 \cdot 33 + 0,39 \cdot 86 + 0,22 \cdot 30 + \frac{1}{3} \cdot 0,002 \cdot 3 + \frac{1}{3} \cdot 0,016 \cdot 8 + \frac{1}{3} \cdot 0,19 \cdot 31 + \frac{1}{3} \cdot 0,133 \cdot 11 = 104,08 \text{ МПа.}$$

Для стали В:

$$\Delta\sigma_{т.р.} = 1,87 \cdot 33 + 0,1 \cdot 86 + 0,63 \cdot 30 + 0,26 \cdot 31 + \frac{1}{3} \cdot 0,019 \cdot 82 + \frac{1}{3} \cdot 0,01 \cdot 11 = 92 \text{ МПа.}$$

Дислокационное упрочнение оценивалось с помощью электронно-микроскопических изображений, при этом учитывались доли феррита и упрочняющей структурной составляющей (УСС), найденные при металлографическом исследовании.

$$\bar{\rho}_d = \rho_\alpha \cdot q_\phi + \rho_{усс} \cdot q_{Б/м} \quad (4)$$

где $\bar{\rho}_d$ – плотность дислокаций (ρ_α – в феррите; $\rho_{усс}$ – упрочняющих структурных составляющих); q_ϕ и $q_{Б/м}$ – доля феррита и УСС соответственно.

По формуле (4) плотность дислокаций для обеих сталей составила:

$$\bar{\rho} = 0,16 \cdot 1 \cdot 10^{11} + 0,84 \cdot 5 \cdot 10^{10} = 12,2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}.$$

Значение дислокационного упрочнения для исследуемых сталей:

$$\Delta\sigma_d = 100 \text{ МПа.}$$

Вклад дисперсионного упрочнения в предел текучести оценивался по механизму Орована:

$$\Delta\sigma_{д.ч.} = (9,8 \cdot 10^3 / \lambda) \ln 2\lambda, \quad (5)$$

где λ – расстояние между частицами.

Для стали А вклад дисперсионного упрочнения в σ_T :

$$\Delta\sigma_{д.ч.} = (9,8 \cdot 10^3 / \lambda) \ln 2\lambda = (9,8 \cdot 10^3 / 1300) \ln 2 \cdot 1300 = 59 \text{ МПа.}$$

Для стали В:

$$\Delta\sigma_{д.ч.} = 9,8 \cdot 10^3 \cdot \ln 2000 / 1000 = 75 \text{ МПа;}$$

Зернограницное упрочнение оценивалось по уравнению:

$$\Delta\sigma_3 = k_y \cdot d^{-1/2}, \quad (6)$$

где k_y – коэффициент характеризующий материал.

С учетом размера зерен, оцененных с помощью металлографических исследований, вклад зернограницного упрочнения в обеих сталях составил:

$$\Delta\sigma_3 \approx 400 \text{ МПа.}$$

В итоге определяем значение предела текучести для стали А:

$$\sigma_T = 30 + 104,08 + 0,01 + 100 + 59 + 400 = 693 \text{ МПа.}$$

Для стали В:

$$\sigma_T = 30 + 92,5 + 100 + 74,49 + 400 = 697 \text{ МПа}$$

В работе также было проведено сравнение полученных по модели аддитивного сложения значений σ_T со значениями, полученными различными исследователями (табл. 2).

Таблица 2

Сопоставление данных настоящего исследования и литературных данных

Компоненты упрочнения	Расчетные данные				По данным [2]		По данным [3]	
	сталь А		сталь В					
	МПа	%	МПа	%	МПа	%	МПа	%
σ_0	30	4	30	4	-	-	100	12
$\Delta\sigma_{т.р}$	104	15	92	13	140	20	100	12
$\Delta\sigma_{д.у}$	59	9	75	11	150	21	210	24
$\Delta\sigma_{\delta}$	100	14	100	15	-	-	130	15
$\Delta\sigma_3$	400	58	400	57	420	59	320	37
$\Delta\sigma_{т. расч}$	693	100	697	100	710	100	860	100

Экспериментальное значение предела текучести, полученное после испытаний на растяжение, для стали А составило 705 МПа, для стали В- 645 МПа.

В результате применения модели аддитивного сложения основных компонентов упрочнения ($\Delta\sigma_3$, $\Delta\sigma_{т.р.}$, $\Delta\sigma_{д.у.}$, $\Delta\sigma_{д.}$) установлено, что наибольший вклад вносит зернограницное упрочнение порядка 57 %.

Вклады дисперсионного ($\Delta\sigma_{д.}$) и дислокационного ($\Delta\sigma_{д.у.}$) составляют близкие между собой величины ~100 МПа (15%), что позволяет производителю сталей варьировать их в желаемом диапазоне.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гольдштейн М. И. Металлофизика высокопрочных сплавов. Учебное пособие / М. И. Гольдштейн, В. С. Литвинов, Б. М. Бронфин. М.: Металлургия, 1986. 312 с.
2. Materials Design: The Key to Modern Steel Products / B.C. De Cooman, J. Speer, I.Yu. Pyshmintsev, N.Yoshinaga // GRIPS Media, 2007. 650 p.
3. Correlation Between Microstructure And Yield Strength In Low-Carbon High-Strength Microalloyed Steels / K. Poorhaydari, B.M. Patchett, D.G. Ivey // Proceedings of IPC 2006 International Pipeline Conference September 25 – 29. Calgary, Alberta, Canada, 2006. P. 2177...2190.